

Vladimíra MICHALCOVÁ<sup>1</sup>, Sergej KUZNETSOV<sup>2</sup>, Stanislav POSPÍŠIL<sup>3</sup>

## MODELÝ ZATÍŽENÍ OBJEKTU OD ÚČINKŮ PROUDOVÉHO POLE

### MODELS OF LOAD ON BULDINGS FROM THE EFFECTS OF THE FLOW FIELD

#### Abstrakt

Článek popisuje vzájemné porovnání dvou rozdílných řešení standardní úlohy stavební aerodynamiky, tj. zatížení objektu tvaru krychle vystaveného účinkům proudového pole vzduchu. Fyzikální modelování probíhá v aerodynamickém klimatickém tunelu Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AVČR v Telči, numerické modelování je řešeno na Stavební fakultě VŠB-TU Ostrava pomocí software Ansys Fluent.

#### Klíčová slova

Aerodynamika, větrný tunel, CFD.

#### Abstracts

Article describes two different approaches of the solution of benchmark solution of bluff aerodynamic, which is the solution of wind pressures upon the cube exposed to the effects of air flow field. Physical modeling is carried out at the wind tunnel of the Institute of Theoretical and Applied Mechanics in Telč whereas numerical modeling is performed at the Faculty of Civil Engineering, VSB Technical University of Ostrava of software using Ansys Fluent.

#### Keywords

Aerodynamics, wind tunnel, CFD.

## 1 ÚVOD

Modelování proudění kolem nízkých objektů neaerodynamických tvarů přináší řadu problémů [3], [4] a platí to jak pro numerické tak i fyzikální simulace. Článek má za cíl porovnat výsledky fyzikálního a matematického modelování proudění vzduchu kolem objektu tvaru krychle o hraně 0,24 m. Představuje tzv. Silsoe krychli v měřítku 1:25, která se postupně stala standardizovaným experimentálním prvkem v oboru stavební aerodynamiky. Důvodem této volby je možnost využití vypovídajících dat z měření v tunelu pro posouzení konečných výsledků obou přístupů [1].

V rámci fyzikálního experimentu bylo na pracovišti CET <http://cet.arcchip.cz/> modelováno hladké proudové pole s konstantním vertikálním rychlostním profilem  $13,5 \text{ m.s}^{-1}$  a s intenzitou turbulence cca 1 %. Předmětem vyhodnocení je tlakové zatížení modelu od účinků proudového pole. Je zde definováno bezrozměrným součinitelem vnějšího tlaku  $c_{pe}$ , který je dán poměrem statického a dynamického tlaku vztažených k referenčnímu bodu:

---

<sup>1</sup> Ing. Vladimíra Michalcová, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, e-mail: vladimira.michalcova@vsb.cz.

<sup>2</sup> Prof. Ing. Sergej Kuznetsov, Ph.D., ÚTAM AV ČR, v.v.i. Centrum excelence Telč, Batelovská 485, 588 56 Telč, e-mail: kuznetsov@itam.cas.cz.

<sup>3</sup> Doc. Ing. Stanislav Pospíšil, Ph.D., ÚTAM AV ČR, v.v.i. Prosecká 809/76, 190 00 Praha 9, e-mail: pospishil@itam.cas.cz.

$$c_{pe,i} = \frac{p_i}{p_{dyn}} = \frac{p_{ci} - p_{ref}}{1/2 \cdot \rho \cdot u_{ref}^2}, \quad (1)$$

kde:

$p_{ref}$  – je statický tlak v referenčním bodu, nejčastěji ve výšce objektu (tady 0,24 m) [Pa],  
(zde vyhodnocený 0,74 metrů před objektem),

$p_{ci}$  – výsledný statický tlak na povrchu objektu v i-tem bodu [Pa],

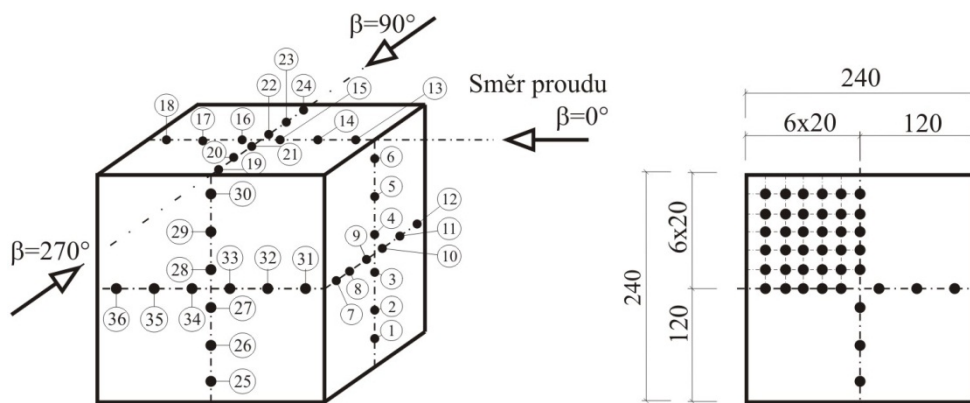
$p_i$  – statický na povrchu objektu v i-tem bodu přepočtený k referenčnímu tlaku [Pa],

$u_{ref}$  – x-ová složka rychlosti v referenčním bodě, nejčastěji ve výšce objektu (tady 0,24 m) [m.s<sup>-1</sup>],  
(zde vyhodnocená 0,74 metrů před objektem),

$\rho$  – hustota vzduchu,  $\rho = 1,225$  [kg.m<sup>-3</sup>],

$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_{ref}^2$  – dynamický tlak větru v referenční výšce, nejčastěji ve výšce objektu [Pa].

Součinitel vnějšího tlaku  $c_{pe}$  byl změřen, vypočítán a vyhodnocen ve dvou vzájemně kolmých řezech a ve vodorovném řezu. Schéma modelu s 36 odběrovými místy je na obrázku 1.



Obr. 1: Schéma modelu

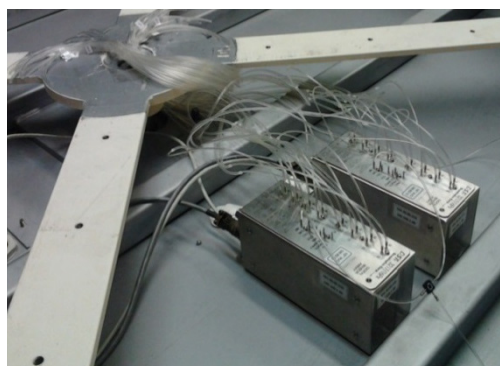
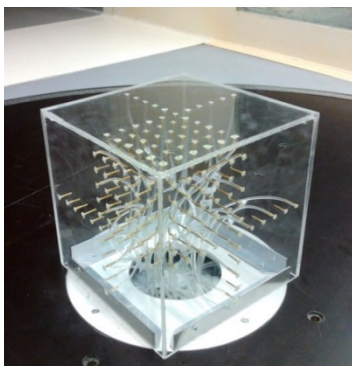
## 2 FYZIKÁLNÍ EXPERIMENT

Experimenty byly provedeny v klimatickém větrném tunelu Centra Excellence Telč, Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR. Pracovní prostor aerodynamické sekce je obdélníkového průřezu 1,9 m (šířka) × 1,8 m (výška). Celková délka proudovodu aerodynamické části je 11,0 m včetně části pro vývoj turbulentní mezní vrstvy. Je-li potřeba, je simulace mezní vrstvy atmosféry s požadovanými charakteristikami modelována za použití prvků, jako jsou sítě, tzv. Counihanovy generátory, bariéry a podlahové desky s různou drsností.

Model krychle byl umístěn ve středu otočného stolu (průměr 1,76 m) v pracovní části aerodynamické sekce tunelu. Krychle byla vyrobena z průhledného plexiskla s tloušťkou stěny 5 mm, drenážní body mají průměr 0,5 mm a jsou vybaveny konektory tvaru kovové trubičky s vnitřním průměrem 1 mm. Všechny konektory drenážních bodů jsou spojené silikonovou trubičkou (délky 1 m a průměru 2 mm) s měřicím zařízením „Scanivalve Corp DSA 3217“ pro snímání tlaku (obr. 2). Data a převod na digitální hodnoty byly sbírány v systému „DEWETRON“ se vzorkovací frekvencí 1 kHz.

Výsledky tlakových součinitelů jsou uváděny jako funkce směru proudění vzduchu  $\beta = 0$  až  $360^\circ$  a lze je zapsat jako  $c_{pe,i} = f(\beta)$ . Interval otáčení modelu kolem svislé osy  $\Delta\beta$  byl  $10^\circ$ . Experimenty byly provedeny při Reynoldsově čísle  $Re = 2,1 \cdot 10^5$  [-], které odpovídalo rychlosti proudění vzduchu  $13,5$  m.s<sup>-1</sup>.

Data z měření statického tlaku vzduchu, přeměna na elektrický signál i vyhodnocení a zobrazení automatizovaných výsledků bylo zpracováno pomocí vysoce akvizičního systému "DEWETRON". Vzorkovací frekvence senzoru činila 1kHz.



Obr. 2: Model objektu v měřicí sekci a detail měřicí sekce

### 3 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

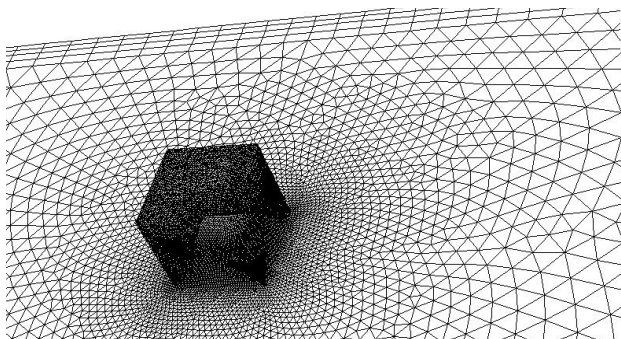
Matematické modely vhodné pro tento typ úlohy lze rozdělit do dvou kategorií:

- RANS modely,
- Modely pro anizotropní turbulenci – RSM, LES a jeho kombinace s RANS modely.

#### 3.1 RANS modely

Jedná se o statistické modely turbulence, které jsou založeny na metodě časového středování (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) veličin turbulentního proudění a na následující proceduře časového středování bilančních rovnic popisujících turbulentní proudění. Využívají tzv. Boussinesquovy hypotézy, která hledá zjednodušené vyjádření Reynoldsových napětí. Pro výpočet úlohy byly použity modely Spalart Allmaras, Standardní k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$  a SST k- $\omega$ , které jsou založeny na modelování izotropní turbulence. Vzájemně se od sebe liší v definování tzv. turbulentní dynamické viskozity, veličiny vyjadřující složité funkční závislosti stavu proudící tekutiny a polohy uvažovaného bodu. Výhodou RANS modelů jsou menší nároky na hustotu mřížky výpočtové oblasti, možnost modelování stacionární úlohy a schopnost rychlého výpočtu.

Bohužel pro řešení obtékání konstrukcí neaerodynamických tvarů jsou méně vhodné, neboť v okolí objektu vzniká silná anizotropní turbulence. Výpočtová oblast pro RANS modely byla vytvořena o velikosti 1,9 m (šířka)  $\times$  1,8 m (výška)  $\times$  4,5 m (délka). Sledovaný objekt byl umístěn ve vzdálenosti 1 metr od vstupu do oblasti. K tvorbě sítě zkoumané oblasti se využívá  $1 \cdot 10^6$  tetra buněk podle obr. 3, na kterém je zřetelné silné zahuštění v okolí objektu i rovnoměrný podélný pás potřebný pro správné řešení okrajové podmínky na bočních stěnách.

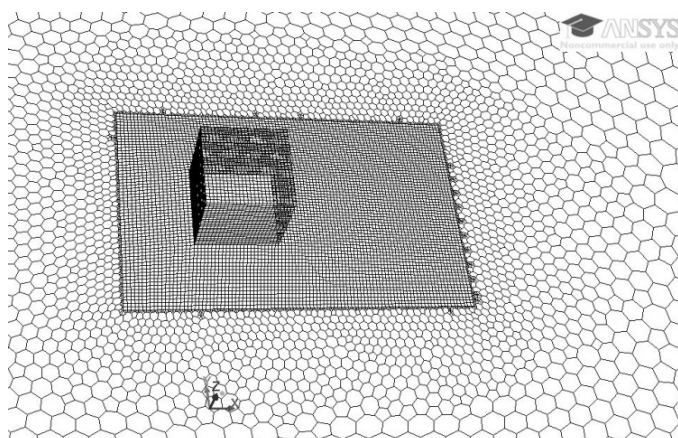


Obr. 3: Tetra mřížka pro RANS a SAS modely - vodorovná rovina v polovině výšky objektu

### 3.2 Modely pro anizotropní turbulenci

Jsou založeny na principu modelování anizotropní turbulence, což lépe odpovídá zkoumanému ději. Kladou však větší nároky na kvalitu a hustotu sítě, úlohy je nutno řešit nestacionárně a výpočtové časy jsou nesrovnatelně delší. Výjimkou je RSM model. Umožňuje řešit úlohu stacionárně, je však velice citlivý a při jeho používání se vyskytují časté problémy s konvergencí. Pro zde prezentované výpočty nebyl použit. Pro řešení úlohy byly použity nově vyvinuté hybridní modely, které jsou kombinací LES [2], [3] a RANS metody, konkrétně SAS a ELES modely. Správnou kombinací umožňují podstatně snížit počet buněk ve výpočtové oblasti a tím znatelně zrychlit výpočtový čas, přestože předávání veličin na rozhraní oblastí částečně také prodlužuje dobu výpočtu.

ELES modeluje v oblasti neuspořádaného proudového pole (v tomto případě okolí obtékaného objektu) velké vírové struktury přímou simulací (LES), v oblasti, kde lze již očekávat uspořádané izotropní proudění pak RANS metodou. Vyžaduje přesné definování rozhraní, což umožňuje lépe připravit síťování. Pro tento výpočet byla vytvořena nová výpočtová oblast o velikosti 1,9 m (šířka)  $\times$  1,8 m (výška)  $\times$  5,0 m (délka) s kombinovaným mřížkováním (obr. 4). Základ tvoří polyhedrické buňky. Definovaná oblast v okolí objektu pro přímou simulaci LES metodou je pak tvořena hustým mřížkováním hexagonálními buňkami. Tato oblast o délce 1 m začíná 0,2 m před objektem, její příčné rozměry převyšují obvod obtékané kostky 0,2 m na každé její stěně. Na obrázku 5 je názorný rozdíl v hustotě mřížkování i pozvolný nárůst velikostí polyhedrických buněk s rostoucí vzdáleností od objektu.



Obr. 4: Kombinovaná mřížka pro ELES model

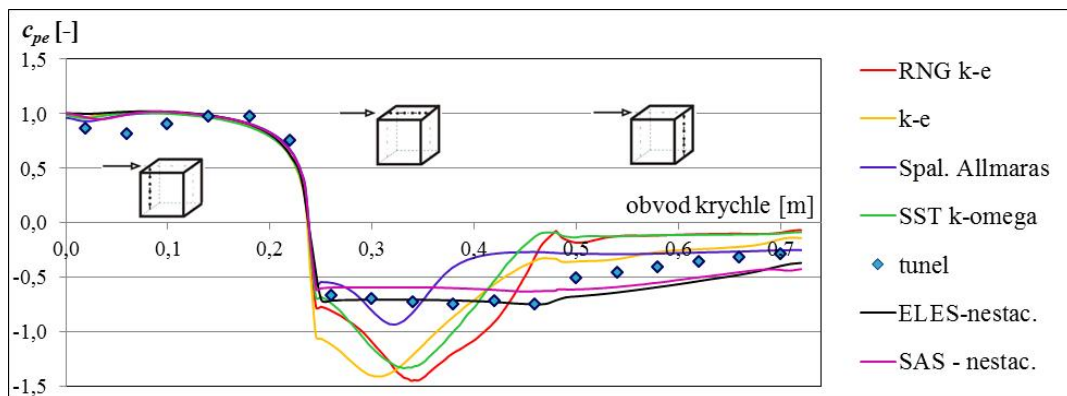
SAS model definuje rozhraní na základě délkového měřítka vírů, v těsné blízkosti stěny se chová jako SST  $k-\omega$  model, ve větší vzdálenosti automaticky přechází v LES výpočet. Jeho hranice není nutné zadávat. Při řešení byla výpočtová oblast shodná s RANS modely (kap.3.1).

### 3.3 Okrajové podmínky

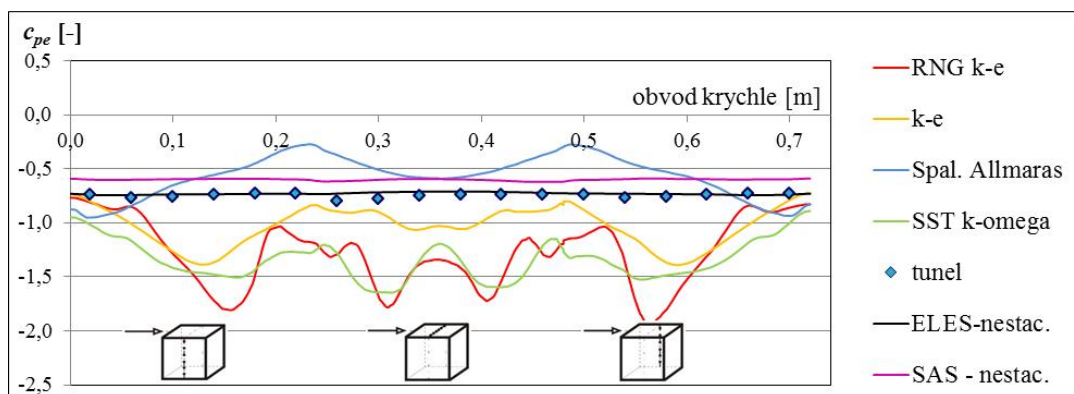
U všech výpočtů byly nastavené shodné typy okrajových podmínek. Na vstupu se jedná o tzv. velocity-inlet, na výstupu je tlaková podmínka pressure-outlet, spodní plocha je prezentována podmínkou wall, což je shodné s modelováním otevřeného prostoru (atmosféry). Okrajové podmínky na obou bocích a horní ploše výpočtové oblasti byly definovány wall, aby odpovídaly ohraničenému prostoru tunelu, což klade další požadavky na tvar mřížky, již zmiňované rovnoměrné rozložení o určité hustotě v okolí stěn (kap.3.1).

## 4 VÝSLEDKY A JEJICH ZHODNOCENÍ

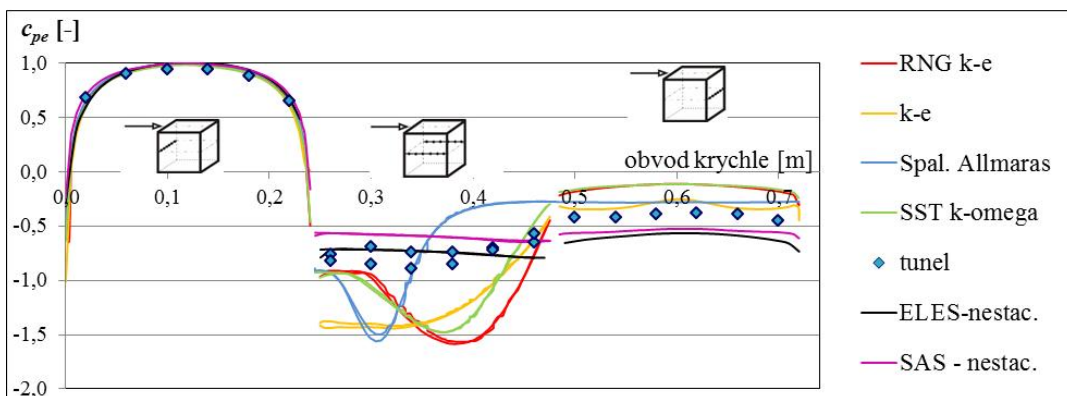
Jak bylo uvedeno výše (kap. 1), součinitel vnějšího tlaku byl změřen, vypočítán a vyhodnocen ve dvou vzájemně kolmých svislých řezech (obr. 5 a 6) a ve vodorovném řezu (obr. 7).



Obr. 5: Hodnoty  $c_{pe}$  koeficientu ve svislém podélném řezu



Obr. 6: Hodnoty  $c_{pe}$  koeficientu ve svislém příčném řezu



Obr. 7: Hodnoty  $c_{pe}$  koeficientu ve vodorovném řezu

Přestože se jedná o proudění s nízkou intenzitou turbulence (1% na vstupu), RANS modely nejsou pro tento typ úlohy vhodné, neboť v okolí objektu, zvláště na jeho bocích a závětrné straně vzniká silně anizotropní turbulence.

Na čelní straně (obr. 5 až 7), kdy zatím nedochází k silnému zavíření, se všechny výpočty shodují s měřením v aerodynamickém tunelu. Markantní rozdíly jsou ve výsledcích tlakového zatížení podél objektu, tedy na bocích a horní stěně. Obrázky 5 až 7, hlavně průběh zatížení v příčném svislém řezu (obr. 7), dokazují nevhodnost RANS modelů pro popis proudového pole. Na závětrné stěně objektu se měřeným hodnotám nejvíce přibližovaly výpočty Spalart Allmaras a Standardním k- $\epsilon$  modelem.

Nestacionárními výpočty ELES a SAS modely bylo dosaženo uspokojivých výsledků. ELES modelem se dokonce podařilo na čelní, horní i obou bočních stěnách získat výsledky téměř shodné s měřeními v aerodynamickém tunelu. Na závětrné straně se liší nepatrně.

Nevýhodou nestacionárních výpočtů je jejich náročnost z pohledu přípravy výpočtu (tvar a hustota výpočtové sítě, správné definování časového kroku) i časové náročnosti. U obou nestacionárních úloh byl zvolen časový krok 0,001 sekundy, výpočet simuloval proud po dobu 4 sekundy s tím, že středování veličin bylo nastaveno až po 1 sekundě simulovaného děje. Tehdy bylo možné považovat proudové pole za ustálené. Výsledný čas proudu při časovém středování veličin představoval asi osminásobnou výměnu vzduchu ve výpočtové oblasti. V rámci jednoho výpočtu proběhlo asi  $4 \cdot 10^4$  iterací.

SAS model správně kopíruje tvar zatěžovací křivky po všech třech sledovaných obvodech obtékané krychle. Malé posunutí by mohlo být odstraněno novou, hustější mřížkou i delším simulovaným časem proudu, což bude předmětem dalšího zkoumání.

## 5 ZÁVĚR

Řešení tohoto úkolu prokázalo, že obtékání objektu neaerodynamického tvaru je pro modelování, ať již experimentální či matematické, složitý děj a vzájemná spolupráce obou přístupů je nutná. Velice uspokojivou podobnost s experimentem prokázaly výsledky numerické simulace ELES a SAS modely v nestacionárních úlohách.

## PODĚKOVÁNÍ

Príspevek byl realizován za finančního přispění z prostředků koncepčního rozvoje vědy, výzkumu a inovací pro rok 2012 přidělených VŠB-TU Ostrava Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Článek vznikl s podporou projektu CZ.1.05/1.1.00/02.0060, který je spolufinancovaný z Evropského fondu pro regionální rozvoj.

## LITERATURA

- [1] RICHARDS, P.J., R.P. HOXEY, B.D. CONNELL a D.P. LANDER. Wind-tunnel modelling of the Silsoe Cube. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics: The Fourth European and African Conference on Wind Engineering*. Vol. 95, 9-11, pp. 1384-1399. ISSN 0167-6105.
- [2] TAMURA, T., A. OKUNO a Y. SUGIO. LES analysis of turbulent boundary layer over steep hill covered with vegetation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics: The Fourth European and African Conference on Wind Engineering*. Vol. 95, 9-11, pp. 1384-1399. ISSN 0167-6105.
- [3] ZHANG, Y.Q., A.H. HUBER, S.P.S. ARYA, W.H. SNYDER. Numerical simulation to determine the effects of incident wind shear and turbulence level on the flow around a building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Computational Wind Engineering*. Vol. 93, 46-47, pp. 129-134.
- [4] ZHANG, A., M. GU. Wind tunnel test and numerical simulations of wind pressures on buildings in staggered arrangement. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics: 4th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2006)*. Vol.96, iss. 10-11, pp. 2067-2079.

## Oponentní posudek vypracoval:

Prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc., Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava.

Prof. Ing. Jozef Melcer, DrSc., Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta, ŽU v Žiline.